

УДК 621.315.592

О. В. Бурбан – аспірант Луцького національного технічного університету

Анізотропія часів релаксації для Δ_1 -мінімуму зони провідності кристалів *n-Ge*

Роботу виконано на кафедрі фізики і електротехніки ЛНТУ

Обчислено параметр анізотропії часів релаксації для L_I та Δ_I -мінімумів зони провідності кристалів n -Ge із різною концентрацією домішки. Показано, що при однобічному деформуванні кристалів n -Ge ($X > 2,4$ ГПа) уздовж кристалографічного напрямку, унаслідок інверсії типу абсолютного мінімуму, зазнає і кількісних, і якісних змін параметр анізотропії часів релаксації.

Ключові слова: параметр анізотропії, час релаксації, одновісна деформація.

Бурбан О. В. Анизотропия времён релаксации для Δ_1 -минимумов зоны проводимости кристаллов n -Ge.

Определён параметр анизотропии времён релаксации для L_I и Δ_I -минимумов зоны проводимости кристаллов n -Ge с разной концентрацией примеси. Показано, что при одноосном деформировании кристаллов n -Ge ($X > 2,4$ ГПа) вдоль кристаллографического направления, вследствие инверсии абсолютного минимума, количественно и качественно изменится параметр анизотропии времён релаксации.

Ключевые слова: параметр анизотропии, время релаксации, одноосная деформация.

Burban O. V. Anisotropy of relaxation time for Δ_1 -minimum of conduction band in n-Ge. The anisotropy parameter of relaxation time for L_i and Δ_1 -minimms of the conduction band in *n-Ge* with different impurity concentrations was calculated. Theory shows that quantitatively and qualitatively changes the anisotropy parameter of relaxation times as a result of the absolute minimum type inversion of the conduction band, about uniaxial stress ($X > 2.4$ GPa) along the crystallographic direction.

Key words: anisotropy parameter, relaxation time, uniaxial stress.

Постановка наукової проблеми та її значення. Рівень розвитку нанoeлектроніки та мікропроцесорної техніки визначається значною мірою досягненнями фізики напівпровідників. Це, у свою чергу, вимагає і нових матеріалів, які можуть бути використані для створення різного роду приладів, і вдосконалення тих, які використовуються. Одним із найбільш перспективних матеріалів, незважаючи на його всебічну вивченість, є германій.

Для передбачення дій різних фізико-активних впливів на фізичні властивості цього матеріалу, потрібно знати особливості зміни зонної структури германію при дії даних факторів.

У n -Ge, крім основних L_I -мінімумів зони провідності, існують додаткові (неосновні) A_I -мінімуми, розміщені по шкалі енергій на $0,18$ eV вище основних у напрямку $\langle 100 \rangle$ (рис. 1).

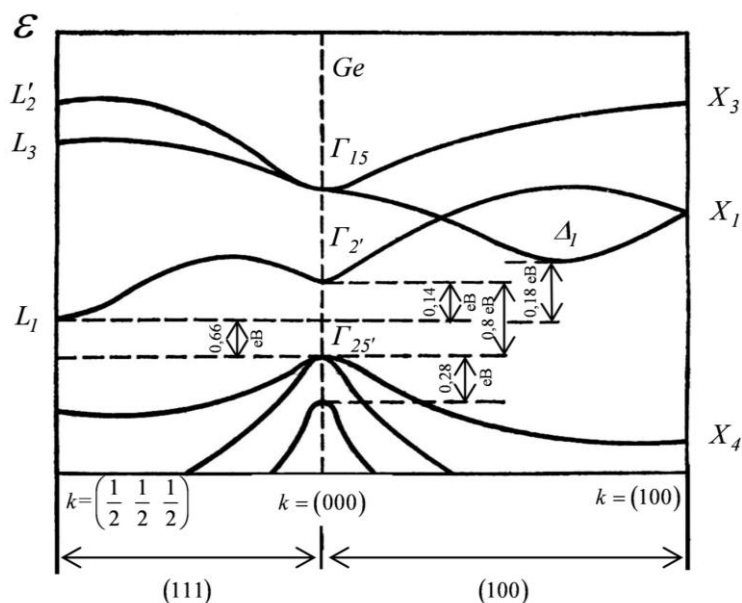


Рис 1. Зонна структура кристалів германію

Значна віддаленість Δ_1 -мінімумів від основних і по енергії, і по квазіімпульсу не сприяла дослідженням впливу їх при малих фізичних збуреннях на властивості матеріалу. Проте в екстремальних умовах направленої дії значних електричних, деформаційних, оптичних та температурних полів Δ_1 -мінімуми вносять суттєвий вклад у відповідні величини, а інколи стають визначальними в енергетичному спектрі кристала. Так, у [1] було показано, що інверсія типу абсолютного мінімуму можлива при одновісному тиску порядку 2,8 ГПа вздовж кристалографічного напрямку. При цьому чотири L_1 -долини будуть підніматися вгору за шкалою енергій, а дві Δ_1 -долини будуть опускатися вниз. Це відкриває перспективи створення на основі германію різного роду електронних приладів та датчиків, які можуть працювати в таких екстремальних умовах.

Дослідження різних кінетичних ефектів у сильно деформованих кристалах n -Ge є актуальним також із точки зору вивчення властивостей наноструктур. Як показує літературний огляд, у наноструктурах з n -Ge існують значні внутрішні напружки [4]. Унаслідок цього можлива перебудова зонної структури з домінуючими вкладками Γ_1 та Δ_1 -мінімумів [5]. Використання технологій створення одновісних деформацій каналів NMOSFET електронних приладів при заміні кристалів n -Si на n -Ge дає можливість збільшити і коефіцієнт підсилення, і тунельний струм.

Тому дослідження різного роду кінетичних ефектів у недеформованих і особливо в сильно деформованих кристалах n -Ge, коли відбувається деформаційна перебудова зонної структури цього матеріалу, є цікавим із теоретичної та актуальним із практичної точок зору.

Через відсутність у науковій літературі відомостей про зміну анізотропії розсіяння носіїв заряду, при реалізації інверсії типу (L_1 – Δ_1) абсолютного мінімуму в кристалах германію, постає потреба визначити величини, які характеризують анізотропію розсіяння носіїв заряду. Однією з таких величин є параметр анізотропії часів релаксації k_τ .

Мета роботи – оцінити анізотропію розсіяння носіїв заряду при реалізації інверсії типу (L_1 – Δ_1) абсолютного мінімуму в кристалах n -Ge. **Завдання** – визначити параметр анізотропії часів релаксації для L_1 та Δ_1 мінімумів зони провідності n -Ge.

Матеріали і методи. Теорія анізотропного розсіяння

Виклад основного матеріалу та обґрунтування отриманих результатів дослідження. Використовуючи теорію анізотропного розсіювання, було обчислено параметр анізотропії часів релаксації k_τ для L_1 та Δ_1 -мінімумів зони провідності кристалів n -Ge з різною концентрацією домішки, який визначається у [3]:

$$k_\tau = \frac{\langle \tau_{\parallel} \rangle}{\langle \tau_{\perp} \rangle}, \quad (1)$$

де $\langle \tau_{\parallel} \rangle$ та $\langle \tau_{\perp} \rangle$ – усереднені компоненти тензора часів релаксації.

Вирази для компонент тензора часів релаксації τ_{\parallel} та τ_{\perp} на основі теорії анізотропного розсіяння в умовах змішаного розсіяння мають такий вигляд [3]:

$$\tau_{\parallel} = \frac{a_{\parallel}}{\sqrt{kT}^{\frac{3}{2}}} \cdot \frac{x^{\frac{3}{2}}}{x^2 + b_0}, \quad \tau_{\perp} = \frac{a_{\perp}}{\sqrt{kT}^{\frac{3}{2}}} \cdot \frac{x^{\frac{3}{2}}}{x^2 + b_1}, \quad (2)$$

де

$$b_0 = \frac{a_{\parallel} \cdot \Phi_{0i}}{\sqrt{kT}^{\frac{3}{2}} \tau_{0i}(kT)}, \quad b_1 = \frac{a_{\perp} \cdot \Phi_{1i}}{\sqrt{kT}^{\frac{3}{2}} \tau_{0i}(kT)}, \quad (3)$$

$$\tau_{0i}(kT) = \frac{\sqrt{2} m_{\perp} \varepsilon^2 (kT)^{\frac{3}{2}}}{\pi N e^4 \sqrt{m_{\parallel}}}, \quad a_{\parallel} = \frac{\pi C_{11} \hbar^4}{k \Xi_d^2 \Phi_{0a} \sqrt{2 m_{\parallel} m_{\perp}^2}}, \quad a_{\perp} = \frac{\pi C_{11} \hbar^4}{k \Xi_d^2 \Phi_{1a} \sqrt{2 m_{\parallel} m_{\perp}^2}}, \quad (4)$$

$$\Phi_{oi} = \frac{3}{2\beta^3} \left(\left(\frac{\beta}{1+\beta^2} - \alpha \right) \ln \gamma^2 - \alpha \ln(1+\beta^2) + 2L(a) + \frac{\beta\gamma^2}{2} \left(\frac{\beta^2-1}{\beta^2+1} + \frac{\alpha(\beta^2+1)}{\beta} \right) \right),$$

$$\Phi_{li} = \frac{3}{4\beta^3} \left(((1-\beta^2)\alpha - \beta) \ln \gamma^2 + 2(\beta^2-1)L(a) - 2\beta^2\alpha - \right.$$

$$\left. (\beta^2-1)\alpha \ln(1+\beta^2) + \frac{\gamma^2}{2} (\beta(1+3\beta^2) + \alpha(3\beta^4 + 2\beta^2 - 1)) \right). \quad (5)$$

Для співвідношень (5) α , β і γ виражають таким чином:

$$\alpha = \text{arctg } \beta, \quad \beta = \frac{m_{\parallel} - m_{\perp}}{m_{\perp}}, \quad \gamma = \sqrt{\frac{\pi \hbar^2 e^2 N}{2m_{\parallel} \varepsilon_0 kT}}, \quad (6)$$

де m_{\parallel} та m_{\perp} – компоненти тензора ефективної маси для відповідного мінімуму зони провідності; Ξ_d – константа деформаційного потенціалу для відповідного мінімуму n -Ge; C_{11} – константа жорсткості для n -Ge; N – концентрація домішки.

Усереднені компоненти часів релаксації для випадку невідродженого електронного газу

$$\langle \tau_{\parallel} \rangle = \frac{4}{3\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} dx \cdot x^{\frac{3}{2}} \cdot e^{-x} \tau_{\parallel}, \quad \langle \tau_{\perp} \rangle = \frac{4}{3\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} dx \cdot x^{\frac{3}{2}} \cdot e^{-x} \tau_{\perp}. \quad (7)$$

Для визначення параметра анізотропії часів релаксації для L_I -мінімуму були використані такі параметри L_I -мінімуму:

$$\Xi_u^L = 16,4 \text{ eV}; \quad \Xi_d^L = -6,4; \quad C_{11} = 0,769 \cdot 10^{-11} \text{ Па}^{-1}; \quad m_{\parallel} = 1,58 m_0; \quad m_{\perp} = 0,082 m_0 \quad [3].$$

Для визначення параметра анізотропії часів релаксації для Δ_I -мінімуму були використані такі параметри для Δ_I -мінімуму:

$$\Xi_d = 0,1 \text{ eV}; \quad \Xi_u = 12 \text{ eV}; \quad m_{\parallel} = 0,6 m_0; \quad m_{\perp} = 0,225 m_0 \quad [2].$$

Враховуючи дані параметрів, було отримано концентраційні залежності параметра анізотропії часів релаксації носіїв заряду для L_I та Δ_I -мінімуму (рис. 2).

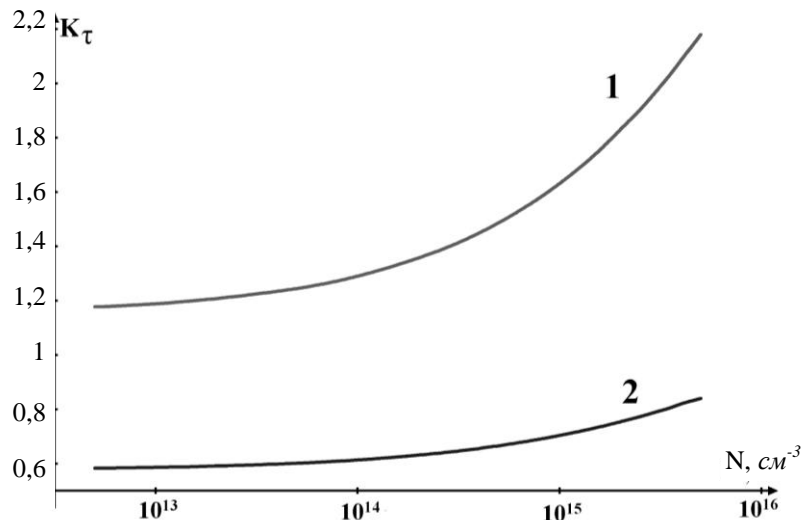


Рис. 2. Залежності параметра анізотропії часів релаксації від концентрації домішки для L_I та Δ_I -мінімумів зони провідності кристалів n -Ge: 1 – для L_I -мінімумів, 2 – для Δ_I -мінімумів

Висновки. Отримані концентраційні залежності параметра анізотропії часів релаксації для L_I та Δ_I -мінімумів показують, що:

- 1) розсіяння носіїв заряду для різних мінімумів є анізотропним;
- 2) величина анізотропії залежить від концентрації домішки, значень компонент тензорів ефективної маси та деформаційного потенціалу для L_I та Δ_I -мінімумів;

3) залежність $k_{\tau} = f(N)$ є більш чутливою до збільшення концентрації для L_I -мінімуму, ніж для Δ_I -мінімуму. Це пояснюється тим, що параметр анізотропії ефективних мас для L_I -мінімуму є набагато більшим порівняно з Δ_I -мінімумом.

Список використаної літератури

1. Инверсия энергетических зон под влиянием предельно больших одноосных упругих деформаций в n-Ge в условиях перехода металл-полупроводник (переход Мотта) / П. И. Баранский, В. Н. Ермаков, В. В. Колomoец, П. Ф. Назарчук : тез. докл. XI Междунар. конф. МАРИВД, Киев, 12–17 июля // Высокие давления в науке и технике. – Киев : ИСМ АН УССР, 1987. – 127 с.
2. Черниш В. В. А. Г. Самойлович і дослідження явищ переносу в пружно деформованому германії / В. В. Черниш // Термоелектрика. – 2006. – № 3. – С. 15–25.
3. Электрические и гальваномагнитные явления в анизотропных полупроводниках / П. И. Баранский и др. – Киев : Наук. думка, 1977. – 269 с.
4. Brunner K. Si/Ge nanostructures / K. Brunner // Rep. Prog. Phys. – 2002. – Vol. 65, № 1. – P. 27–72.
5. Huo Y. Strained Ge and GeSn band engineering for Si photonic integrated circuits : a dissertation for the degree of doctor of philosophy : 10.2010 / Y. Huo. – Stanford, 2010. – 139 p.

Стаття надійшла до редколегії
08.10.2012 р.